管路系流体解析モデルによるトンネル内高速列車突入退出時の 圧力波伝播解析 秋村 友香* 神長 龍一* 松原 聖** 三橋 利玄*

Analysis of Pressure Wave Propagation When a High-Speed Train Enters and Exits a Tunnel by Pipeline System Fluid Analysis Model

Yuka Akimura*, Ryuichi Kaminaga*, Kiyoshi Matsubara** and Toshiharu Mitsuhashi*

管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γに、新たに導入したポーラスモデルによる移動物 体と流体の連成モデルを用いることにより、高速列車が鉄道トンネル突入退出する際の圧力変動や、走 行するトラックからの排気ガスの道路トンネル内での換気の様子などの検討が行える。新幹線やリニア 新幹線で代表される高速列車がトンネル突入退出時の圧力変動の解析の検証を実施し、新たに導入した モデルの妥当性を確認した。

Keywords:移動物体、ポーラスモデル、流体との連成解析、管路系流体解析、鉄道トンネル突入退出、 高速列車、音響騒音

1. はじめに

高速列車が鉄道トンネル(以下、単にトンネル) 突入退出する際に発生する圧力変動は、トンネル 外部に放射されるトンネル微気圧波による環境 騒音や、車体内部に侵入して引き起こす乗客への 不快な刺激など、さまざまな影響がみられ、車体 構造や換気装置の設計において対策が検討され ている[5]。車体構造の設計において、3次元流体 解析ソフトウェアによる車体周りの空力解析が 利用されているが、最新の計算機でも膨大な計算 時間が必要とするため、車体構造の変更や数多く のパラメータに対して3次元空力解析を数多く実 施することを困難としている。そこで、数多くの パラメータ検討のために、1次元非定常圧縮性流 体解析のシミュレーションが利用されている [4][5]。

文献[4][5]で示されているシミュレーション手 *アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニア リングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Centre, AdvanceSoft Corporation **アドバンスソフト株式会社 代表取締役 President, AdvanceSoft Corporation 法とは別の手法として、アドバンスソフト株式会 社が開発・販売を進める管路系流体解析ソフト ウェア Advance/FrontNet/Γ(以下、FrontNet/Γ と略)に、ポーラスモデルによる移動物体と流体 の連成モデルを新たに導入し、高速列車がトンネ ル突入退出する際の圧力変動の予測を可能とし ている。

FrontNet/Γは、管路系内の圧力伝播や熱流体、 熱量、成分濃度の過渡応答を解くことができ、多 成分系移流拡散モデル、構造物熱伝導モデル、対 流および放射熱伝達モデル、管摩擦モデル、パッ シブスカラーモデル、実在物性流体モデルなどを 組み合わせることにより、気体、液体、超臨界流 体、極低温流体に対するさまざまな物理現象を取 り扱うことができる。また、流体機器モデルとし て、弁(逆止弁や制御弁)、ファン・ブロワ、ポン プ、タービン、熱交換器、自由度の高い制御系を 取り扱うことができ、管路系システムを構築し、 熱流体と流体機器の連成計算を行うことができる。

本稿では、FrontNet/Гに導入したポーラスモデ ルによる移動物体と流体の連成モデルの検証を 目的として実施した新幹線車両模型による試験 解析やリニア新幹線で代表される高速列車のト ンネル突入退出時の圧力変動解析を紹介する。

2. ポーラスモデルによる移動物体モデル

流体中を物体が移動して流体がその影響を受けるような解析はさまざまな分野で行われており、設計や品質改良、コスト削減などモノづくり に貢献している。例えば、回転翼周りの流体解析、 津波漂流物の解析、トンネル内の車両通過による 気流解析、自動ドア開閉時の人体移動気流解析な どさまざまな例が挙げられる。

本章では、配管やトンネルなどの1次元近似が よく成り立つ系を対象として、FrontNet/Гに導入 した FAVOR 法[1][2][3]よる移動物体との連成モ デルについて、管路系流体への適用方法を紹介する。

FAVOR 法では 1 つのメッシュ内で多孔質物体 による流動抵抗を用い、移動物体を扱う場合は体 積占有率と面開口率を時々刻々変化させる。車両 等の移動物体が流路を通過する際のイメージを 図 1に示す。

$\gamma_{\nu}: 質量・エネルギー保存式の支配領域に占める流体の体積割合$ $<math>\gamma_{\chi}: 質量・エネルギー保存式の支配領域エッジに占める流体の面積割合$ 質量・エネルギー保存式の支配領域



図 1 流路内移動物体の FAVOR 法のモデル化

FAVOR 法では体積占有率(ポロシティ)と面 開口率を次のように定義する。なお、スタガード 格子の採用により運動量と質量・エネルギー保存 式の離散化式における支配領域が異なるため、そ れぞれの体積占有率(ポロシティ)と面開口率を 個別に扱う。

① 体積占有率(ポロシティ)

 $\gamma_V = V_{fluid} / V_{mesh}$

②面開口率

 $\gamma_x = A_{fluid} / A_{mesh} \tag{2}$

ここで、V_{mesh}はメッシュ体積、A_{mesh}はメッシュ 断面積、V_{fluid}は流体が存在できる体積、A_{fluid}は 流体が通過できる面積である。なお、いずれも質 量・エネルギー保存式の支配領域で定義される。

(2) 運動量保存式の場合

① 体積占有率 (ポロシティ)
$$\delta_V = V_{fluid} / V_{mesh}$$
 (3)

② 面開口率

$$\delta_x = A_{fluid} / A_{mesh} \tag{4}$$

ここで、Vmeshはメッシュ体積、Ameshはメッシュ 断面積、Vfluid は流体が存在できる体積、Afluid は 流体が通過できる面積である。なお、いずれも運 動量保存式の支配領域で定義される。

FAVOR 法を FrontNet/Γに導入するに当たり、 上記の体積占有率と開口率を用いて基礎方程式 を以下のように書き換える。

〕 質量保存式
$$\frac{\partial \gamma_V \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \gamma_x \rho u = 0$$

ここで、*ρ*は密度、*t*は時間、*u*は流速を示している。② 運動量保存式

$$\frac{\partial \delta_V \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot \delta_x \rho u u + \delta_x \nabla p + \delta_V \frac{1}{2} \frac{K}{L} \rho u^2 + \sum (1 - \delta_x) \frac{1}{2} \frac{\lambda_T}{d_T} \rho (u - V_T)^2 - \delta_V \rho g \sin \theta = 0$$
(6)

ここで、pは圧力、Kは摩擦や流路抵抗などによる 損失係数、Lは支配領域の長さ、 $g \sin \theta$ は重力を示 している。左辺第5項は移動物体と流体との摩擦 項を表し、すれ違いも含めて複数の移動物体を考 慮するために、総和として表している。なお、 λ_T は移動物体と流体との摩擦係数、 d_T は移動物体の 等価直径、 V_T は移動物体の速度を示している。 ③ エネルギー保存式

$$\frac{\partial \gamma_V E}{\partial t} + \nabla \cdot \gamma_x (E+p)u - \gamma_V \frac{HA_w (T_w - T_f)}{V_f} + \sum (1 - \delta_x) \frac{1}{2} \frac{\lambda_T}{d_T} \rho(|u| - V_T|)^3 = 0$$
(7)

(5)

ここで、Eは全エネルギー、Hは壁面熱伝達係数、 Twは壁温、Tfは流体温度、Vfは支配領域の流体体積 を示している。左辺第4項は移動物体と流体との 摩擦熱を表し、運動量保存式と同様に複数の移動 物体を考慮するために、総和として表している。

移動する物体に合わせて、体積占有率と開口率 を刻一刻変化させながら、質量保存式、運動量保 存式、エネルギー保存式を陽解法または陰解法で 解くことで、移動物体の影響を受けた流路内の圧 力、温度、流速などの変化が計算できる。

3. 高速車両突入退出時のトンネル内圧力変動試 験解析

ポーラスモデルによる移動物体モデルの検証 目的として、1/97 スケールの新幹線車両模型によ る突入退出時のトンネル内圧力変動試験解析を 行い、実測値と比較した。計算モデルと計算条件 は参考文献[4][5]を基に設定した。なお、状態方程 式も同文献を基に等エントロピー変化を仮定し た式(8)を用いた。

 $PV^{\gamma} = const.$

(8)

3.1. 単列車突入退出時のトンネル内圧力変動試験

計算モデルと計算条件を図 2 と表 1 に示す。 列車は時速 500km でトンネル入口の vol.1 から トンネルを模した vol.2 に突入する。vol.2 退出後 はトンネル出口の vol.3 を通過する。列車の長さ は 1.3m であり、先頭と後尾の長さは 0.0519m で 形状は線形としている。



計算結果と参考文献[5]の測定値を比較した結 果を図 3~図 5に示す。それぞれトンネル入り口 から 2.35m, 2.7m, 5.35m 地点の計算値と測定値 であり、図 3と図 5が圧力の時間推移、図 4が 流速の時間推移である。計算と測定で車両速度の 立ち上げと初期座標がずれているため、第一ピー クの立ち上がりが合うようにグラフを平行移動

表 1 計算条件(サイドブランチなし)

分類	項目	設定
列車	摩擦係数λ _τ	0.015
(ポーラス)	先頭の損失係数	0.0
	後尾の損失係数	0.0012
	列車速度V _T [km/h]	500
	列車形状 γ_x , δ_x	0.11975
トンネル	摩擦係数	0.02
(vol.2)	等価直径[mm]	100
	長さ[m]	14.7
	メッシュ幅[m]	0.001
	初期温度[℃]	15
	初期圧力[kPaG]	0
境界条件	温度指定[℃]	15
(vol.1, 3)	圧力指定[kPaG]	0
流体物性	分子量[g/mol]	28.8
(理想気体空気)	定圧比熱[J/kgK]	1006.3
	粘性係数[Pa・s]	1.8×10^{-5}
数值解法	時間発展スキーム	陽解法
	Courant 数	0.7

している。

図 3 と図 5 により、計算が測定の圧力変動を よく再現していることから、列車の突入退出時の 圧力波やトンネル出入口の反射波をポーラスモ デルによる移動物体モデルで再現できることが 分かる。

図 4 では時刻 100ms~140msの流速変動は再 現できていないが、ピークは捉えられているため、 定性的に合っているという結果であった。これは、 トンネル断面の平均流速を表している計算に対 し、測定はトンネル断面のある点の流速を計測し ていることが原因の1つであると考えられる。

3.2. 単列車突入退出時のサイドブランチ付きトン ネル内の圧力変動試験

計算モデルと計算条件を図 6 と表 2 に示す。 列車は時速 500km で vol.1, 2, 4, 3 の順に移動す る。列車形状については 3.1 と同じである。分岐 部の jct.4, 6 の等価直径はサイドブランチの面積



図 3 圧力の計算値と測定値の比較(トンネル 入口から 2.35m 地点)



図 4 流速の計算値と測定値の比較(トンネル 入口から 2.7m 地点)







表 2 計算条件(サイドブランチ付き)

項目	設定
摩擦係数λ _τ	0.015
先頭の損失係数	0.0
後尾の損失係数	0.0012
列車速度V _T [km/h]	500
列車形状 γ_x , δ_x	0.11975
摩擦係数	0.02
等価直径[mm]	100
長さ[m]	3.075
メッシュ幅[m]	0.001
摩擦係数	0.02
等価直径[mm]	100
長さ[m]	11.625
メッシュ幅[m]	0.001
摩擦係数	0.02
等価直径[mm]	67
長さ[m]	2.05
メッシュ幅[m]	0.001
初期温度[℃]	15
初期圧力[kPaG]	0
温度指定[℃]	15
圧力指定[kPaG]	0
等価直径[mm]	47.4
分子量[g/mol]	28.8
定圧比熱[J/kgK]	1006.3
粘性係数[Pa・s]	1.8×10^{-5}
時間発展スキーム	陽解法
Courant 数	0.7
	項目 摩擦係数λ _T 先頭の損失係数 後尾の損失係数 列車速度V ₇ [km/h] 列車形状 _λ 、δ _x 摩擦係数 客価直径[mm] 長さ[m] メッシュ幅[m] く たで[m] 長さ[m] 長さ[m] 長さ[m] 長さ[m] 長さ[m] 長さ[m] 月 た[m] (加期 二 (加期 二 (加 (加 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)

の半分となるような直径に設定した。

計算結果と参考文献[5]の測定値を比較した結 果を図 7~図 9に示す。それぞれトンネル入り口 から 2.0m, サイドブランチ付け根から 1.3m, 2.05m 地点の計算値と測定値であり、図 7 と図 8 が圧力の時間推移、図 9 が流速の時間推移である。 本節も計算と測定で車両速度の立ち上げと初期 座標がずれているため、第一ピークの立ち上がり が合うようにグラフを平行移動している。

図 7 と図 8 により、計算が測定の圧力変動を よく再現していることから、サイドブランチが付 いている場合も列車突入退出おける圧力波を ポーラスモデルによる移動物体モデルで再現で きることが分かる。

図 9の流速変動は、計算は測定に比べて高いが、 全体の傾向は再現できている。



図 7 圧力の計算値と測定値の比較(トンネル 入口から 2.0m 地点)



図 8 圧力の計算値と測定値の比較(サイド ブランチ付け根から 1.3m 地点)



図 9 流速の計算値と測定値の比較(サイド ブランチ付け根から 2.05m 地点)

4. 超高速列車トンネル突入退出時の圧力波伝播 解析

ポーラスモデルによる移動物体モデルの検証 目的として超高速列車(リニア新幹線)がトンネ ルを突入退出する際の圧力変動の計算を行い、実 測値と比較検討を行った。計算のモデルと計算条 件は参考文献[6]を基に設定した。

計算モデルと主要な計算条件を図 10と表 3に 示す。長さ4,000mのトンネルの出入口に、トン ネル微気圧波と呼ばれる圧力波緩和のため、トン ネル断面積より大きな断面積を持つ筒状の緩衝 工が設けられている。トンネルと緩衝工は管路と してモデル化し、長さ80.3mの超高速列車をポー ラスモデルによる移動物体モデルにより管路内 を列車速度に応じて移動するようにした。

列車速度については、突入時 500km/h、退出時 210km/h という情報があるものの、途中の速度変 化が不明となっている。そこで、公開されている 列車の先頭位置を基に列車速度変化を算出した。 列車先頭位置の推移と算出した列車速度変化を 図 11 に示す。

表 3に示した計算条件において、粗度を非現実 的な値として 1m としている。これは、通常の値 では、圧力がほとんど減衰せずに伝播するので、 実測値と合うように調整した結果として設定し たものである。実際のトンネル内にはさまざまな 部材、突起、溝などがあり、それらによって大き な圧力損失があると考えられる。

また、同表において示した時間刻み幅は、音速 基準の Courant 数に置き換えても 0.07 と極端に 小さい。これは、後述の音響解析において、数千 Hz 程度まで解像できることを目的として、この ような時間刻み幅を設定している。

4.1. 管路系流体解析

FrontNet/Γ による解析によって得られた計算 結果と実測値の比較を図 12 と図 13 に示す。実 測値はトンネル入口から 150m(A 点)と 3,700m(E 点)が公開されている。

A 点における 10 秒付近の圧力上昇を伴う突入 波と列車通過に伴う圧力減少は再現されている が、列車通過に伴う圧力減少はやや小さい。その 後の突入波と退出波の反射波も良く再現されて いるが、65秒付近と85秒付近にみられる退出波 の反射波の減衰が小さく、伝播速度が計算結果の 方がやや速くなっている。

E点における圧力変化はA点と同様のことがい える。20秒から25秒にかけての圧力変化は突入 波と突入波の反射波によるものである。45秒付近 はそれらの反射波であり、50秒手前の圧力減少は 列車通過に伴うものである。また、50秒過ぎの圧 力上昇は退出波によるものであり、その後は反射 波の繰り返しによる圧力変化である。いずれも実 測値を良く再現しているが、退出波の伝播速度が 計算結果の方がやや速くなっている。

図 14 は列車のトンネル突入時の圧力分布の変 化を示している。列車突入の際に発生した突入波 が若干減衰しつつも波形を変えることなく伝播 していく様子が窺える。

No.	項目	内容
1	全長[m]	4,114
2	計算格子数	4,114
3	数值解法	陽解法
4	状態方程式	空気の理想気体
5	時間刻み幅[s]	$1.0 imes 10^{-4}$
6	管摩擦モデル	Churchill
7	粗度[m]	1.0
8	列車と流体間の摩擦係数	0.01

恚	3	主亜た計質条件	•
X	Э	土安な可异木件	•



図 15 は列車のトンネル退出時の圧力分布の変 化を示している。列車退出の際に発生する退出波 は列車の進行とは逆方向に伝播していく様子が 窺える。なお、列車退出時では列車速度を 210km/h まで落としているため、退出波は突入波 に比べると退出時の圧力上昇はかなり小さく なっている。



トンネル内 E 点の圧力変化の比較

図 13



図 14 列車突入時の圧力分布変化



4.2. 音響解析

新幹線では「トンネルドン」と呼ばれているよ うな微気圧差で振動や突発的な音が問題になっ ている。ポーラス移動物体モデルを組み込んだ FrontNet/Tによって得られた出口付近の圧力変 化を、当社独自で開発した有限要素法による音響 解析プログラム Advance/FrontNoiseに与えて、 音響解析を行った。本解析では、トンネルと緩衝 工の壁における音の吸収はない(完全反射)とし て解析を行い。緩衝工の出口における音の評価を 行った。実際には、トンネル壁や緩衝工の壁にお ける音の吸収はあり、また、評価点もトンネル出 口からある程度離れた場所で行う。従って、本 ケースは、①完全反射としたこと、②出口におけ る音の評価を行ったことから、ワーストケースの 解析と考えられる。

図 16 では 15Hz 以下の周波数でかなり大きな 圧力(kPa のオーダー)となっており、トンネル坑 口周辺の民家の建具を揺らす影響がある可能性 も考えられる。また、図 17 の音圧レベルでは 300Hz 前後(五線譜上の「レ」から「ミ」にかけ ての音相当)に 60dB 余りのピークがみられる。 このピークは、トンネル構造の共鳴等ではなく、 流体解析で得られた音源のピークに対応する。し かし、60dB は普通の会話程度の比較的に静かな 音に当たるので車両速度を出口付近にかけて減 速していることと緩衝工を設けていることなど により音圧が抑えられていると考えている。

以上の解析から、可聴域ではトンネル出口付近 の民家への影響は少ないことが分かった。また、 可聴域よりも低い振動での影響評価では、トンネ ル坑口周辺の民家の建具の振動を発生させる可 能性がある。このことをさらに確認するためには、 今回実施したワーストケースの解析ではなく、よ り現実に条件の解析で評価する必要があると考 えられる。



図 16 周波数に対する圧力分布



図 17 周波数に対する音圧レベル分布

5. まとめ

本稿では、FrontNet/Гに導入したポーラスモデ ルによる移動物体と流体の連成モデルの検証を 目的として実施した新幹線車両模型による試験 解析やリニア新幹線で代表される高速列車のン ネル突入退出時の圧力変動解析により得られた 計算結果は試験結果や実測結果とよく一致して いることを示した。

車両模型による試験解析の計算時間は 10 分程 度あり、高速列車のトンネル突入退出時の圧力変 動解析の計算時間は 3~4 時間程度であったので 実用的な計算が行えることが示されている。

今後は計算機能の高度化や移動物体と流体の 連成モデルに関連する GUI などの整備を通じて、 より実用的で利便性の高いものを目指す予定で ある。

参考文献

- W. Hirt et al, "A Porosity Technique for the Definition of Obstacle in Rectangular Cell Meshes" 4th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, 1985. Washington DC.
- [2] 森川 泰成, "移動境界問題に関する気流の数 値シミュレーション技術-FAVOR法の適用例 ", 大成建設技術研究所報(1990).
- [3] 米山望他, "FAVOR 法を用いた陸上遡上津波 に伴う漂流物挙動の数値解析",水工学論文 集,52 (2008).
- [4] Sanetoshi SAITO, et al, "Numerical Simulation of 1-D Unsteady Compressible Flow in Railway Tunnels" Journal of Environment and Engineering, Vol. 6, No. 4, 2011.
- [5] 斎藤実俊「高速鉄道におけるトンネル内圧力 変動と微気圧波に関する研究」,大阪大学大 学院 博士論文 2015
- [6] 山崎ら「超高速鉄道トンネル内に生じる圧力 変動評価」,土木学会論文集 No. 788/I-64, 171-189, 2003.7

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、 アドバンスソフト株式会社 ホームページのシ ミュレーション図書館から、PDFファイルが ダウンロードできます。(ダウンロードしてい ただくには、アドバンス/シミュレーション フォーラム会員登録が必要です。)